



2020

액화가스 산적운반선/연료추진선 열전달 해석 지침

한 국 선 급



2020

액화가스 산적운반선/연료추진선 열전달 해석 지침

“액화가스 산전운반선/연료추진선 열전달 해석 지침”의 적용

이 지침은 별도로 명시하는 것을 제외하고 2020년 7월 1일 이후 건조 계약되는 선박에 적용한다.

차 례

제 1 장 총칙	1
제 1 절 적용	1
제 2 절 용어 정의	1
제 3 절 지침 개요	2
제 4 절 제출 자료	3
제 2 장 분석적 열전달 해석법	5
제 1 절 해석 절차	5
제 2 절 모델링	6
제 3 절 재료 물성치	14
제 4 절 계산 조건	18
제 5 절 결과 도출	20
제 3 장 유한요소 열전달 해석법	22
제 1 절 모델링	22
제 2 절 재료 물성치	23
제 3 절 계산 조건	23
제 4 절 결과 도출	23

제 1 장 총칙

제 1 절 적용

101. 적용

1. 이 지침은 멤브레인 형식 액화가스 산적운반선의 선체 및 멤브레인 형식 액화가스 연료추진선의 선체의 열전달 해석 평가 절차에 적용한다.
2. 이 지침은 액화가스 산적운반선 및 액화가스 연료추진선의 선체 강재 등급 및 용접봉 선정에 적용한다.
3. 이 지침의 요건은 선급 및 강선 규칙의 다른 요건에 추가하여 적용한다.

102. 동등효력

이 지침의 규정을 적용하는 것이 적합하지 아니하거나 이 지침에 규정되어 있지 아니한 특수한 방법, 절차가 이 지침의 규정에 적합한 것과 동등이상의 효력이 있다고 우리 선급이 인정하는 경우에는 이 지침의 규정에 적합한 것으로 본다. 이 경우에 열전달 해석 평가가 본 지침의 기준과 최소 동등하다는 것을 검증하기 위해 관련 정보를 우리 선급에 제출하고 평가방법에 대하여 선급과 협의하여 진행해야 한다. 초기 설계 단계에서 다른 방법을 쓰는 의도가 충분히 협의되어야 한다.

제 2 절 용어 정의

201. 적용

용어의 정의는 별도로 정하는 경우를 제외하고는 선급 및 강선 규칙에 따른다.

202. 전체 열전달 계수

대류, 복사 및 전도에 의한 열전달을 모두 고려한 열전달 계수를 의미한다.

203. Prandtl number

속도 경계층과 열 경계층의 상대적인 두께를 표시하며, 열확산율(thermal diffusivity)에 대한 운동량확산율(momentum diffusivity)의 비율을 나타낸다.

204. Nusselt number

유체의 전도에 대한 대류의 비율을 의미한다.

205. Rayleigh number

Grashof number와 Prandtl number의 곱셈으로 계산되며, 열전달이 전도로 발생하는지 혹은 대류로 발생하는 지를 표시한다.

206. Reynolds number

유체에 작용하는 점성력(viscous force)에 대한 관성력(inertia force)의 비율을 의미한다.

207. Grashof number

유체에 작용하는 점성력에 대한 부력(buoyancy force)의 비를 표시한다.

제 3 절 지침 개요

301. 일반사항

1. 액화가스 산적운반선/연료추진선의 화물탱크/연료탱크는 액화가스의 저온 온도로 인해 선체 구조를 저온으로 만들 가능성이 있다. 일반적으로 강재는 저온에서 취성이 증가하기 때문에, 적절한 강재 선정을 통한 액화가스 산적운반선/연료추진선 선체의 취성 파괴를 방지하여야 한다. 이를 위하여 IGC Code에서는 액화가스 산적운반선의 열전달 해석을 수행하고, 이에 기초한 선체 구조의 강재를 선정하도록 규정하고 있다.

302. 열전달해석방법

1. 일반

- (1) 이 지침에서는 두 가지 열전달 해석 방법을 적용한다. 첫 번째는 분석적 열전달 해석 방법(Analytical Heat Transfer Analysis Method)이고, 두 번째는 유한요소 열전달 해석 방법(Finite Element Heat Transfer Analysis Method)이다.
- (2) 이 지침에서 제시하는 열전달 해석 방법의 순서도는 그림 1.1과 같다.
- (3) 사용자는 두 가지 열전달 해석 방법에서 어느 방법을 사용할지를 결정하여야 한다.

2. 분석적 열전달 해석방법

- (1) 분석적 열전달 해석방법은 기본 열평형 방정식을 풀어서 온도를 구하는 방법으로, 쉽게 적용 가능하며 온도 값을 예측할 수 있다. 계산된 온도는 각 구획의 평균 온도를 의미하며 이를 기반으로 강재 등급이 선정되고 최종적으로 용접봉 등급도 선정된다.
- (2) 프로그램 입력을 위하여 선박의 항해 구역에 기초하여 대기 온도, 해수 온도 및 풍속을 선정하게 된다. IMO IGC Code 혹은 USCG에서 제시하는 값을 사용할 수도 있다. 열전달 해석을 위한 물성을 정의하여야 하며, 강재, 단열재, 해수, 대기 등의 물성의 온도를 고려하여 선정하여야 한다. 분석적 열전달 해석을 위한 입력 값이 모두 준비된 후에 해석을 수행한다. 해석 결과로 얻어진 각 부분의 온도를 기초로 하여 강재 등급을 선정하게 된다. 또한 선정된 강재를 기반으로 용접봉 등급이 선정된다.

3. 유한요소 열전달 해석 방법

- (1) 유한요소 열전달 해석 방법은 복잡한 선체 구조를 고려한 평가 방법으로 선체 온도 분포를 예측할 수 있다. 선체의 각 구획이 여러 개의 요소로 분할되어 해석이 수행되기 때문에, 하나의 구조 부재를 따라 온도 분포를 가지도록 계산된다. 구조 부재의 평균 온도를 계산하여 이를 기반으로 강재 등급 및 용접봉 등급을 선정한다.
- (2) 유한요소 열전달 해석 방법을 선택한 경우 일반 유한 요소 해석 소프트웨어를 사용할 수 있다. 해석을 수행하고자 하는 선체 구조를 고려하여 2차원 해석 모델링 혹은 3차원 해석 모델링 작업을 수행하여야 한다. 프로그램 입력을 위하여 선박의 항해 구역에 기초하여 대기 온도, 해수 온도 및 풍속을 선정하여야 한다. 이 때 IMO IGC Code 혹은 USCG에서 제시하는 값을 사용할 수 있다.
- (3) 열전달 해석을 위한 물성을 소프트웨어에 입력하여야 한다.
- (4) 해석 결과로 얻어진 각 부분의 온도를 기초로 하여 강재 등급을 선정하게 된다. 이때 사용하는 온도는 부재의 평균 온도를 사용하여 강재 등급을 선정한다. 용접봉은 부재의 평균 온도를 사용하여 결정된 강재 등급에 기반하여 선정한다.

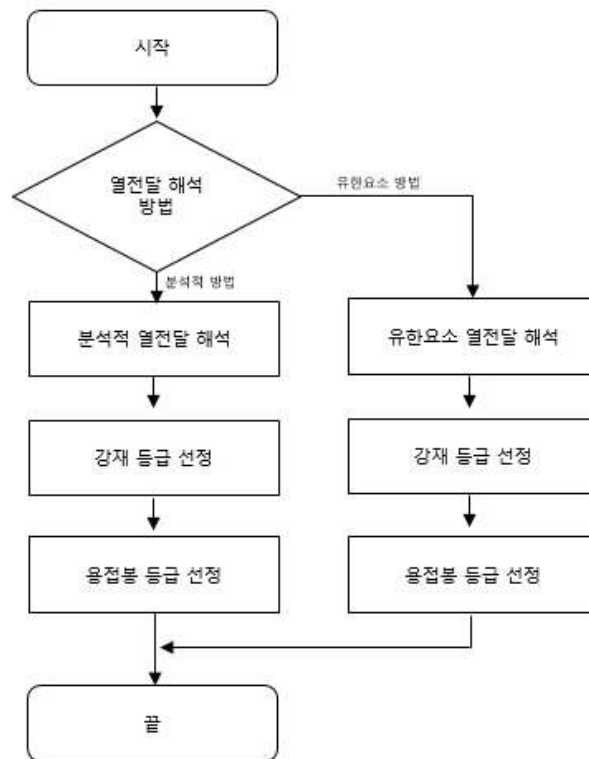


그림 1.1 열전달 해석 순서도

제 4 절 제출 자료

401. 승인용자료

1. 액화가스 산적운반선/연료추진선 열전달 해석 평가법에 따라 다음 자료를 제출하여 우리 선급의 승인을 받아야 한다.
또한, 우리 선급이 필요하다고 인정하는 경우에는 아래에 규정된 것 이외의 자료 제출을 요구할 수 있다.

- (1) 분석적 열전달 해석 방법으로 진행하는 경우

- (가) 열전달 해석 모델링, 열전달 해석 설계 조건 및 경계 조건 등 해석 관련 일반 사항
- (나) 열전달 해석 결과
- (다) 강제 선정 결과
- (라) 재료 물성치 및 근거
- (마) 액화가스 산적운반선인 경우, 화물격납설비 도면 및 관련 지지부 자료
 - (a) 화물 격납설비 종류 관련 자료
 - (b) 대표 기본 모델 상세 도면
- (바) 액화가스 연료추진선의 경우, 연료탱크 도면 및 관련 지지부 자료
 - (a) 연료 탱크 종류 관련 자료
 - (b) 대표 기본 모델 상세 도면

- (2) 유한요소 열전달 해석 방법으로 진행하는 경우

- (가) 열전달 해석 모델링, 열전달 해석 설계 조건 및 경계 조건 등 해석 관련 일반 사항
- (나) 열전달 해석 결과
- (다) 강제 선정 결과
- (라) 필요한 경우, 용접봉 선정 결과
- (마) 재료 물성치 및 근거
- (바) 액화가스 산적운반선인 경우, 화물격납설비 도면 및 관련 지지부 자료

- (a) 화물 격납설비 종류 관련 자료
- (b) 대표 기본 모델 상세 도면
- (사) 액화가스 연료추진선의 경우, 연료탱크 도면 및 관련 지지부 자료
 - (a) 연료 탱크 종류 및 관련 자료
 - (b) 대표 기본 모델 상세 도면

402. 참고용자료

1. 액화가스 산적운반선의 경우
 - (1) 선박의 주요 재원
 - (2) 냉각속도(cooling down speed), 화물의 적재 제한 높이 등의 화물 운용상의 제한 조건
 - (3) 각 화물창에서 화물격납설비 배치도
 - (4) 화물격납설비가 설치된 상태의 선박 일반 배치도
 - (5) 화물격납설비의 설계 제한 조건
2. 액화가스 연료추진선의 경우
 - (1) 선박의 주요 재원
 - (2) 냉각속도, 화물의 적재 제한 높이 등의 화물 운용상의 제한 조건
 - (3) 연료탱크 배치도
 - (4) 연료탱크 설계 제한 조건 ↕

제 2 장 분석적 열전달 해석법

제 1 절 해석 절차

101. 분석적 열전달 해석 절차

1. 분석적 열전달 해석은 그림 2.1의 순서도를 따라서 수행한다.
 - (1) 분석적 2차원 열전달 해석을 수행할 단면을 그림 2.2와 같이 구획으로 나누는 작업을 진행한다.
 - (2) 구획에 대한 경계 조건을 정의한다. 이는 구획에 속한 모든 부재의 길이, 폭 및 면적, 해수 온도, 대기 온도, 풍속, 강재의 방사율(emissivity)을 포함한다.
 - (3) 구획 및 부재의 초기 온도를 가정한다.
 - (4) 전체 열전달 계수를 계산한다.
 - (5) 구획 및 부재 온도를 계산한다.
 - (6) 온도의 변화가 기준 값 이하가 되면 계산을 멈추고, 그렇지 않으면 (4)단계로 가서 계산을 수행한다.
 - (7) 해석 수행 대상 단면의 마지막 구획까지 위의 작업을 수행한다.
 - (8) 선제 온도 계산 결과를 얻는다.
2. 분석적 열전달 해석 방법은 반복적 절차(iterative procedure)를 통해 수행한다. 반복 횟수를 감소시키기 위해서, 초기 온도를 접촉하는 주위 환경에 따라 대기 온도 혹은 해수 온도로 설정한다.

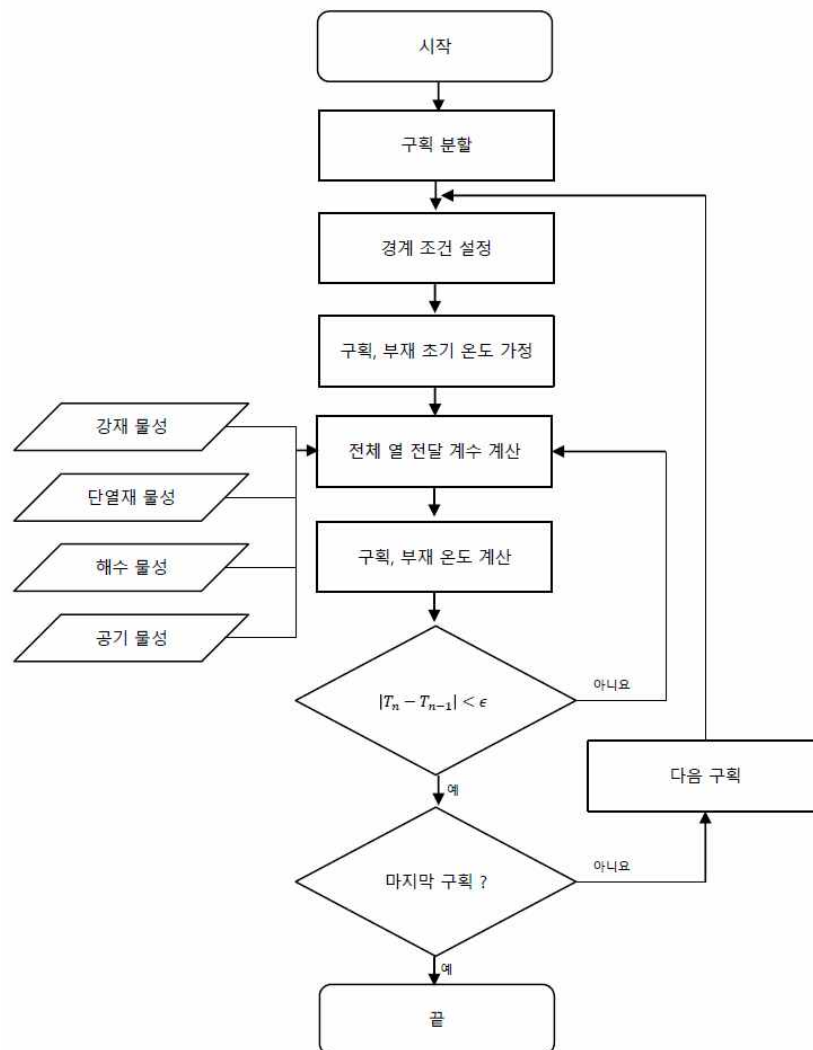


그림 2.1 분석적 열전달 해석을 위한 iterative procedure 순서도

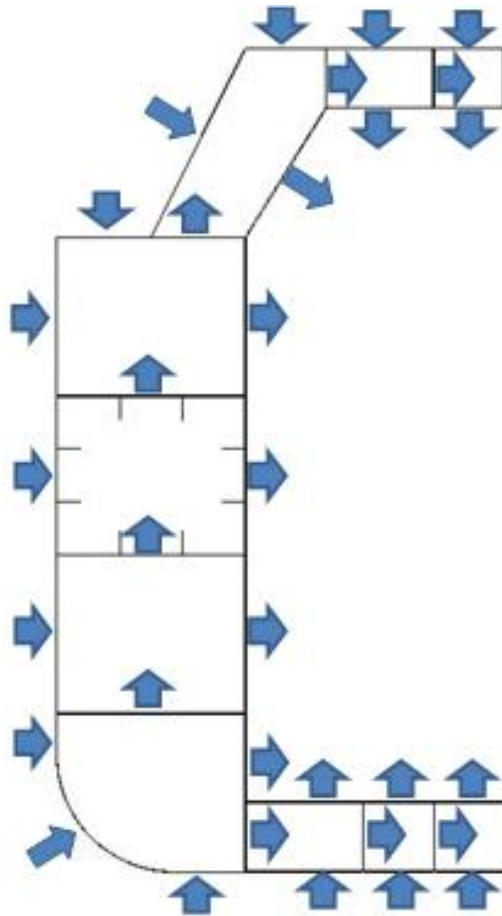


그림 2.2 액화가스 산적운반선의 열전달 해석을 위한 구획 분할

제 2 절 모델링

201. 1차원 열전달 해석 모델

- 1차원 열전달 해석 모델은 분석적 열전달 해석 방법을 이해하는데 필요한 정보를 제공하며, 2차원 모델은 1차원 모델이 확장한 것이다. 1차원 열전달 해석 모델은 수평 및 수직 모델로 고려하며, 예제를 그림 2.3에 표시하였다.

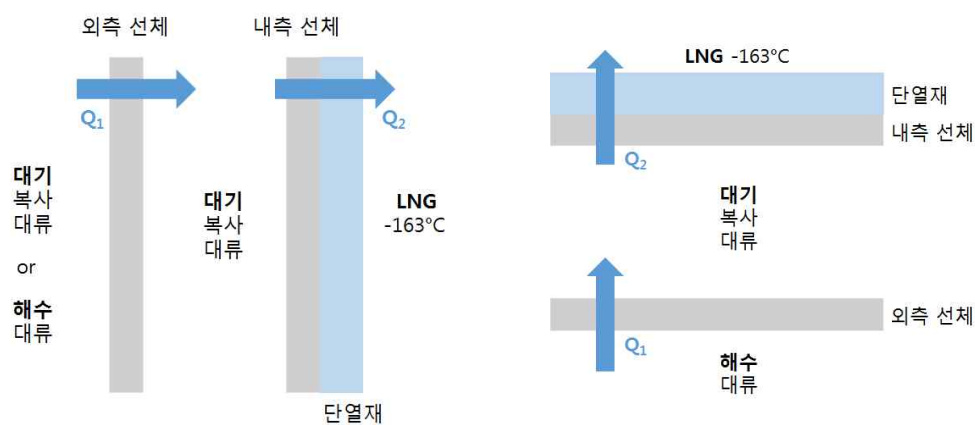


그림 2.3 1차원 수평 및 수직 열전달 해석 모델 예제

2. 1차원 열전달 해석의 평형식은 다음과 같이 정의된다.

$$\sum Q = 0$$

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 = 0$$

3. 1차원 열전달 해석 모델의 열전달은 전체 열전달 계수를 사용하여 다음과 같이 정의된다.

$$Q_n = U_n \cdot A_n \cdot (T_1 - T_2)$$

U : 전체 열전달계수

A : 열전달 단면적

4. 전체 열전달 계수는 대류, 전도 및 복사 열전달 계수의 조합으로 구해지며, 위의 경우는 다음과 같이 정의된다.

(1) Q_1 에 대한 전체 열전달 계수

$$1/U_1 = 1/(h_{C,EN/OH} + h_{R,EN/OH}) + t_{OH}/k_{OH} + 1/(h_{C,OH/CO} + h_{R,OH/CO})$$

(2) Q_2 에 대한 전체 열전달 계수

$$1/U_2 = 1/(h_{C,CO/IH} + h_{R,CO/IH}) + t_{IH}/k_{IH} + t_{INS}/k_{INS} + 1/(h_{C,INS/LNG} + h_{R,INS/LNG})$$

EN : 주위

OH : 바깥 선체

IH : 내부 선체

INS : 단열재

CO : 구획

h_C : 대류 열전달 계수

h_R : 복사 열전달 계수

t : 두께

k : 열전도도

(3) 대류 열전달 계수(h_C)는 다음과 같이 계산한다.

$$h_{conv} = \frac{N_u \cdot k}{L}$$

N_u : Nusselt number

k : 유체 열전도도

L : 특징 길이

(4) 복사 열전달 계수(h_R)는 다음과 같이 계산한다.

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$$

σ : 스테판볼츠만 상수($5.6703 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)

ε : 방사율

5. 구획, 부재의 온도는 예제 그림 2.4 상태에서 강제 온도를 구하는 방식과 동일한 방식으로 구한다.

(1) 선체 외판을 통과하는 열유속은 다음과 같이 표시한다.

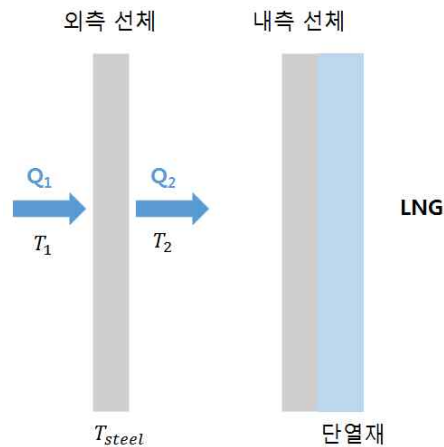


그림 2.4 LNG 화물 탱크의 외부에서 내부로 열유속 흐름 개념도

$$Q_1 = U_1 A (T_1 - T_{steel}), \quad Q_2 = U_2 A (T_{steel} - T_2)$$

U_1, U_2 : 전체 열전달 계수

T_1 : 대기/해수 온도

T_2 : 구획 온도

A : 열전달 단면적

(2) 평형상태에서 강제 온도는 다음과 같이 구한다.

$$Q_1 = Q_2 = U_1 A (T_1 - T_{steel}) = U_2 A (T_{steel} - T_2)$$

$$T_{steel} = \frac{U_1 T_1 + U_2 T_2}{U_1 + U_2}$$

202. 2차원 열전달 해석 모델

1. 분석적 열전달 해석 방법에서 선체 구조의 열전달은 2차원적으로 고려한다. 그림 2.5은 선체 측면 및 선저에서의 열전달 경로를 표시하고 있다. 그림 2.5에 표시된 주변 유체(대기 혹은 해수)의 형태 및 열전달 방향은 분석적 열전달 해석을 실시할 때 고려하여야 한다.

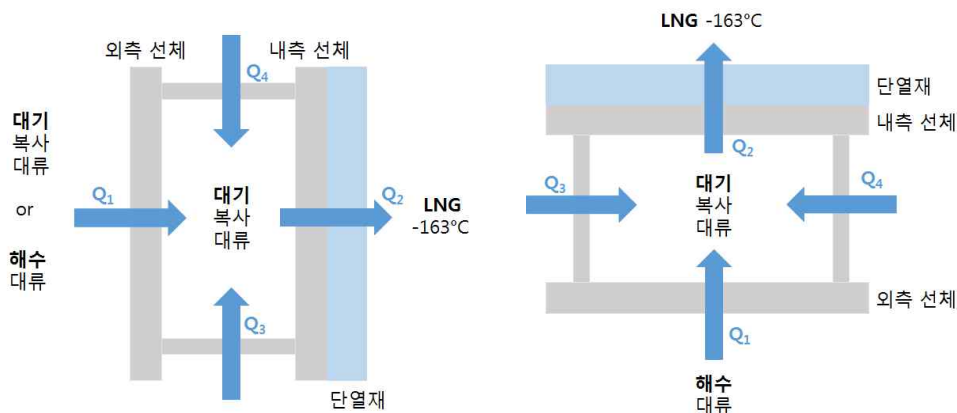


그림 2.5 2차원 열전달 해석 모델 예제

2. 분석적 2차원 열전달 해석의 평형식은 다음과 같이 기술한다.

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0$$

$$U_1 A_1 (T_E - T_C) + U_2 A_2 (T_C - T_L) + U_3 A_3 (T_{OC1} - T_C) + U_4 A_4 (T_{OC2} - T_C) = 0$$

T_E : 주변 온도

T_C : 목표 구획 온도

T_L : 액화가스 온도

T_{OC} : 접촉 구획 온도

203. 열전달 기본 모델

1. 1차원 및 2차원 열전달 해석 모델은 다음의 전도 열전달, 대류 열전달 및 복사 열전달로 기술된다.

2. 전도 열전달

(1) 단위 면적당 전도에 의한 열전달율은 푸리에(Fourier) 식에 의해서 다음과 같이 기술된다.

$$q = -k \cdot \text{grad}(T)$$

q : 열유속

k : 열전도도

$\text{grad}(T) = \partial T / \partial n$ 는 등온도 표면 수직방향의 온도 유도(derivative)

(2) 실 구조물에 있어서 열유속은 다음과 같이 기술된다.

$$q = k(T_1 - T_2)/t$$

t : 두께

3. 대류 열전달

(1) 대류 열전달은 다음 식에 의해서 기술된다.

$$q = h(T_1 - T_2)$$

h : 대류 열전달 계수

(2) 자연 대류는 Nusselt number를 이용하여 대류 열전달 계수를 계산한다.

$$h = \frac{N_u k}{L}$$

N_u : Nusselt number

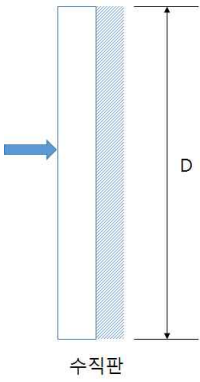
k : 열전도도

L : 특징 길이(characteristic length)

(가) 선체 구조에 있어서, 자연대류는 열린 공간에서도 발생하고 밀폐된 코퍼덤에서도 발생한다.

(나) 수직판에 대한 Nusselt number는 표 2.1과 같이 구해진다.

표 2.1 수직판에 대한 Nusselt number

형상	특징 길이
 수직판	D
R_a 범위	Nusselt number, N_u
$\leq 10^9$	$N_u = 0.68 + \frac{0.670 Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/P_r)^{9/16}]^{4/9}}$
$> 10^9$	$N_u = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/P_r)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$

(다) Rayleigh number(R_a)는 다음과 같이 구해진다.

$$R_a = G_r \cdot P_r$$

(라) Prandtl number(P_r)는 다음과 같이 구해진다.

$$P_r = \frac{\mu C_p}{k}$$

μ : 역학점도(dynamic viscosity)

C_p : 비열(Specific heat)

k : 열전도도

(마) Grashof number(G_r)는 다음과 같이 구해진다.

$$G_r = L^3 g \Delta T \beta \cos(\theta) / \nu^2$$

L : 특징 길이

g : 중력가속도

ΔT : 온도 차이

β : 열팽창계수

θ : 판재 각도($0 \leq \theta \leq 60^\circ$)

ν : 동점도(kinematic viscosity)

(바) 수평판에 대한 Nusselt number는 표 2.2 및 표 2.3과 같이 구해진다.

표 2.2 수평판에 대한 Nusselt number

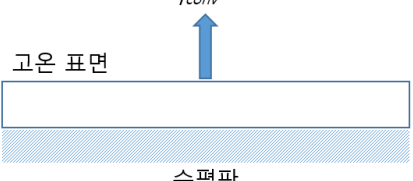
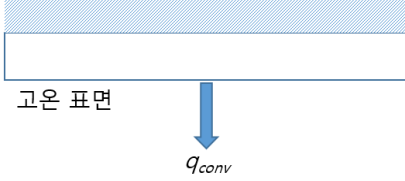
형상	상세	특징 길이
	고온 판재의 윗부분 혹은 저온 판재의 아래 부분	A_s/P A_s : 표면적 P : 둘레 길이
R_a 범위	Nusselt number, N_u	
$10^4 \sim 10^7$	$N_u = 0.54 R_a^{1/4}$	
$10^7 \sim 10^{11}$	$N_u = 0.15 R_a^{1/3}$	

표 2.3 수평판에 대한 Nusselt number

형상	상세	특징 길이
	고온 판재의 아래 부분 혹은 저온 판재의 윗부분	A_s/P A_s : 표면적 P : 둘레 길이
R_a 범위	Nusselt number, N_u	
$10^5 \sim 10^{11}$	$N_u = 0.27 R_a^{1/4}$	

(사) 경사판에 대한 Nusselt number는 $\theta < 60^\circ$ 인 경우에, 수직판 Rayleigh number의 g 를 $g \cos \theta$ 로 바꾸어서 계산한다.

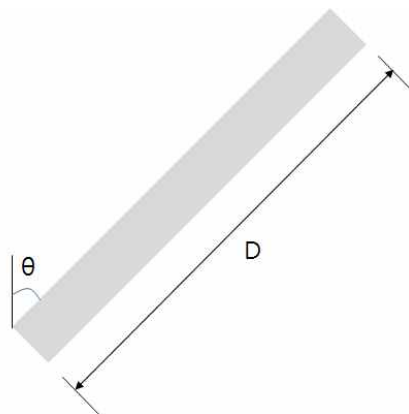


그림 2.6 경사판 각도 정의

(3) 강제 대류는 Nusselt number를 다음 식(McAdams's formula)을 사용하여 계산한다.

$$N_u = 0.037 \cdot R_e^{4/5} \cdot P_r^{1/3}$$

R_e : Reynolds number

P_r : Prandtl number

(4) 보강재 핀 효과(Fin effect)

(가) 액화가스 산적운반선/연료추진선 선체 구조의 종보강재와 횡보강재를 포함하고 있다. 이 보강재들은 대류 열전달 계수에 영향을 주며, 그 관계를 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$h_{fin} = \Phi \cdot h$$

h : 대류 열전달 계수

Φ : 핀 효과 상수

(나) 보강재들은 핀과 같은 역할을 하며, 핀 효과는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\Phi = \frac{(A_{unfin} + \eta_{fin} A_{fin})(T_b - T_{\infty})}{A_{no fin}(T_b - T_{\infty})}$$

η_{fin} : 핀 효과

T_b : 표면 온도

T_{∞} : 내부 구획 온도

A_{unfin} : 핀 부분을 뺀 나머지 부분 면적

$A_{no fin}$: 핀이 없는 부분 면적

A_{fin} : 핀 면적

(다) T-bar 및 앵글은 웹브만을 고려한 평강으로 치환하여 핀 효과를 고려해야 한다.

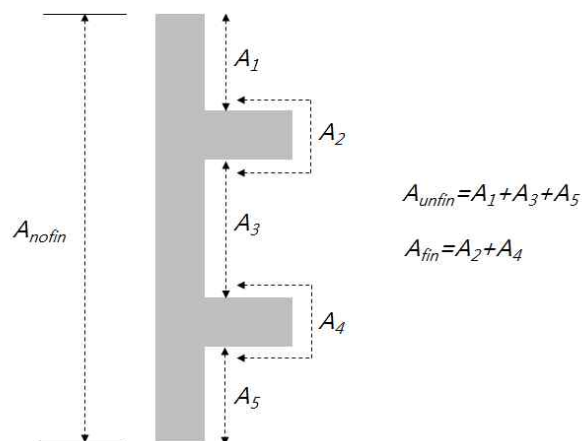


그림 2.7 핀효율 계산을 위한 형상 정의

4. 복사 열전달

(1) 복사에 의해 열전달이 이루어 질 때, 그 관계식은 다음과 같다.

$$q = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

σ : 스테판볼츠만 상수, $5.6703 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

ε : 방사율

T_1 : 복사표면 온도

T_2 : 흡수체 온도

제 3 절 재료 물성치

301. 일반

1. 설계자는 열전달 해석에 필요한 재료 물성치를 얻어야 한다.
2. 설계자는 액화가스 저온 환경 효과를 포함한 재료 특성을 평가하여야 한다.
3. 재료 물성치는 재료 공급자, 공표된 데이터 또는 재료 실험을 통해서 얻어진 값을 사용하여야 한다. 이것이 어려울 경우, 302.에서 305.까지의 규정한 값을 사용할 수 있다.

302. 강제 물성

1. 강제 열전도율은 표 2.4를 참조한다.

표 2.4 강재의 열전도율

재료	열전도율[W/mK]		
	0°C	-100°C	-163°C
탄소강	59		
2.5% Ni강	38	33	
3.5% Ni강	34	29	21
5.0% Ni강	31	26	19
9.0% Ni강	28	23	16

2. 강제 방사율(emissivity)은 표 2.5를 참조한다.

표 2.5 상온에서 탄소강 표면 방사율

강재의 형태	온도 범위(K)	방사율
Polished Sheet	300~500	0.08~0.14
Commercial Sheet	500~1200	0.20~0.32
Heavily oxidized	300	0.81

3. 스테인리스강 및 인바(36%Ni강)에 대한 열전도율은 다음 식에 의해서 구하며, 관련 상수는 표 2.6의 값을 사용한다.

$$\log_{10} k = a + b(\log_{10} T) + c(\log_{10} T)^2 + d(\log_{10} T)^3 + e(\log_{10} T)^4 + f(\log_{10} T)^5 + g(\log_{10} T)^6 + h(\log_{10} T)^7 + i(\log_{10} T)^8$$

표 2.6 스테인리스강 & 인바(36%Ni강) 상수

계수	스테인리스강(304, 304L, 316)	인바(36% Ni강)
a	-1.408	22.0061
b	1.3982	-127.5528
c	0.2543	303.647
d	-0.6260	-381.0098
e	0.2334	274.0328
f	0.4256	-112.9212
g	-0.4658	24.7593
h	0.1650	-2.239153
i	-0.0199	0
적용 범위 온도(K)	1~300	100~300

303. 해수 물성

1. 해수 밀도는 표 2.7을 참조한다.

표 2.7 해수 밀도[kg/m³]

해수 온도[°C]	염도[‰]		
	20	30	40
0	1016.0	1024.0	1032.0
10	1015.2	1023.0	1030.9
20	1013.4	1021.1	1028.8
30	1010.7	1018.2	1025.8

2. 해수 비열은 표 2.8을 참조한다.

표 2.8 해수 비열[kJ/kgK]

해수 온도[°C]	염도[‰]		
	20	30	40
0	4.080	4.020	3.963
10	4.079	4.023	3.969
20	4.078	4.025	3.974
30	4.079	4.028	3.979

3. 해수 열전도도는 표 2.9를 참조한다.

표 2.9 해수 열전도도[W/mK]

해수 온도[°C]	염도[‰]		
	20	30	40
0	0.570	0.570	0.569
10	0.587	0.587	0.586
20	0.602	0.602	0.601
30	0.616	0.616	0.615

4. 해수 동점도(kinematic viscosity)는 표 2.10을 참조한다.

표 2.10 해수 동점도[$10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$]

해수 온도[°C]	염도[‰]		
	20	30	40
0	18.23	18.43	18.65
10	13.35	13.51	13.69
20	10.29	10.43	10.58
30	8.23	8.36	8.49

5. 해수 Prandtl number는 표 2.11를 참조한다.

표 2.11 해수 Prandtl number

해수 온도[°C]	염도[‰]		
	20	30	40
0	13.25	13.31	13.40
10	9.41	9.48	9.56
20	7.06	7.12	7.19
30	5.51	5.57	5.63

304. 대기 물성

1. 대기 물성은 표 2.12를 참조한다.

표 2.12 대기 물성치

대기 온도[°C]	밀도[kg/m ³]	비열[kJ/kgK]	전도도[W/mK]	kinematic viscosity [10 ⁻⁶ m ² /s]	열팽창[10 ⁻³ /K]	Prandtl Number
-150	2.793	1.026	0.0116	3.08	8.21	0.760
-100	1.980	1.009	0.0160	5.95	5.82	0.740
-50	1.534	1.005	0.0204	9.55	4.51	0.725
0	1.293	1.005	0.0243	13.3	3.67	0.715
20	1.205	1.005	0.0257	15.11	3.43	0.713
40	1.127	1.005	0.0271	16.97	3.20	0.711
60	1.067	1.005	0.0285	18.9	3.00	0.709

305. 청수 물성

1. 청수 물성은 표 2.13을 참조한다.

표 2.13 청수 물성치

온도 [°C]	밀도 [kg/m ³]	열전도도 [k, W/m · k]	동점도 [μ, kg/m · s]	Prandtl Number, Pr	부피 팽창 계수[β, 1/K]
0.01	999.8	0.561	1.792×10^{-3}	13.5	-0.068×10^{-3}
10	999.7	0.580	1.307×10^{-3}	9.45	0.733×10^{-3}
20	998.0	0.598	1.002×10^{-3}	7.01	0.195×10^{-3}
30	996.0	0.615	0.798×10^{-3}	5.42	0.294×10^{-3}
40	992.1	0.631	0.653×10^{-3}	4.32	0.377×10^{-3}
50	988.1	0.644	0.547×10^{-3}	3.55	0.451×10^{-3}
60	983.3	0.654	0.467×10^{-3}	2.99	0.517×10^{-3}
70	977.5	0.663	0.404×10^{-3}	2.55	0.578×10^{-3}
80	971.8	0.670	0.355×10^{-3}	2.22	0.653×10^{-3}
90	965.3	0.675	0.315×10^{-3}	1.96	0.702×10^{-3}
100	957.9	0.679	0.282×10^{-3}	1.75	0.750×10^{-3}

제 4 절 계산 조건

401. 계산조건

1. 화물온도가 -10°C 미만인 경우, 선체 구조에 사용되는 판 및 평강의 재료 등급을 결정하기 위하여 모든 탱크 형식에 대해 온도 계산을 수행하여야 한다. 계산 시 다음의 계산 조건을 적용하여야 한다.
 - (1) 계산의 대상으로 하는 선박의 상태는 계획만재 홀수 상태로 하여야 한다.
 - (2) 온도 분포 및 열전달은 정상상태에서 취급하고, 과도 상태는 고려하지 않아도 좋다.
 - (3) 모든 탱크의 1차 방벽은 화물온도로 가정하여야 한다.
 - (4) 액체화물은 균일온도로 가정한다.
 - (5) (3)호에 추가하여, 완전 또는 부분 2차 방벽이 요구되는 경우, 2차 방벽은 임의의 1개 탱크에 대해 표준대기압에서 화물온도와 같다고 가정하여야 한다.
 - (6) 항해구역이 제한되지 않는 경우, 주위온도가 대기는 5°C 및 해수는 0°C 로 하여야 한다. 한정된 항로를 운항하는 선박에 대해서는 높은 주위온도를 적용할 수 있다. 반대로, 동계에 더 낮은 온도가 예상되는 지역을 운항하는 선박에 대해서는 우리 선급이 인정하는 경우 낮은 온도를 적용할 수 있다. 필요 시 표 2.14을 참조할 수 있다.

표 2.14 IGC 및 USCG Code 열 설계 요건

규칙	대기온도[$^{\circ}\text{C}$]	해수온도[$^{\circ}\text{C}$]	풍속[knots]
IGC Code	5.0	0.0	0.0
IGC Code, 고온 조건	45.0	32.0	0.0
USCG, 알래스카 해 제외 조건	-18.0	0.0	5.0
USCG, 알래스카 해 조건	-29.0	-2.0	5.0

- (7) 대기 및 해수가 잔잔한 조건으로 가정하여야 한다. 즉 강제 대류에 대한 조정이 없어야 한다.
- (8) 해수는 밀도 $1,025\text{kg/m}^3$ 및 응고점 -2.5°C 로 하는 이외에는 청수와 같은 성질로 가정한다.
- (9) 열 및 기계적 노후화, 압착작용(compaction), 선박운동 및 탱크 진동과 같은 요소로 인한 선박의 수명동안 단열재 특성의 열화를 가정하여야 한다.
- (10) 해당되는 경우, 액체화물로부터 누설되는 화물의 증발증기로 인한 냉각효과가 고려되어야 한다.
- (11) 가열장치가 402.의 2항을 만족하는 경우, 402.의 1항에 따른 선체가열이 있는 것으로 한다.
- (12) 402.의 1항에 기술된 경우를 제외하고, 임의의 가열방법은 인정하지 않는다.
- (13) 단열재, 지지구조 등의 화물창구역내의 구조물은 액체화물을 흡입하지 않는 것으로 가정한다.
- (14) 화물창구역 이외의 기체가 존재하는 구획 내에는 자연대류가 되고 있는 것으로 가정한다.
- (15) 동구획내의 기체는 동일온도로 가정한다.
- (16) 단열재 내부의 기체이동은 없는 것으로 가정한다.
- (17) 습기의 영향은 없는 것으로 가정한다.
- (18) 도장의 영향은 없는 것으로 가정한다.
- (19) 각종 경계벽의 열전달율은 지침 표 2.15에 나타난 치수를 사용할 수 있으나 보통 공표된 전열공학 자료의 실험치를 기본으로 하여 계산할 수 있으며, 이 경우에 복사에 의한 열전달도 고려하여야 한다.

표 2.15 각종 경계벽의 전체 열전달율

경계벽	열전달율($\text{W/m}^2\text{C}$)
정지 기체 ↔ 선체 또는 액체	5.8
정지 해수 ↔ 선체	116.3
화물 증기 ↔ 공기에 접한 선체	11.6

- (20) 온도 분포 검토 대상의 물체는 일반적으로 방향성이 없는 균질의 것으로 가정한다.
- (21) 휨보강재는 핀(fin)으로 취급할 수 있다.
- (22) 검토대상의 화물창구역의 전후 화물창구역이 동일 조건하에 있는 경우 2차원 문제로 취급할 수 있다.

2. 계산의 대상으로 하는 화물탱크의 손상은 다음에 따른다. 다만, 일체형탱크 및 독립형탱크 형식 C에 관한 화물탱크의 손상은 고려하지 않아도 좋다.
 - (1) 화물탱크는 선체의 횡방향 수밀격벽간에 있는 모든 화물탱크가 손상한 것으로 한다. 다만, 선체의 횡단면이 선체의 종통격벽에 의해 2개 이상의 구획으로 분할된 경우 각각의 구획내의 모든 화물탱크가 손상한 것으로 가정한다.
 - (2) 화물탱크의 손상개소는 예상되는 모든 부분을 포함한다.
 - (3) 화물탱크의 손상시는 액체화물만 누설유출하는 것으로 보고 화물 탱크 지지구조 및 설치물 등이 변형 또는 파괴되지 않는 것을 가정한다.
 - (4) 완전 2차 방벽이 요구될 경우는 화물액의 누설유출은 순간적으로 일어나고 손상화물 탱크내의 잔액과 화물창 구역 내 유출액위는 바로 동일액면에 달하는 것으로 가정한다.
 - (5) 화물탱크 손상상태시 2차 방벽의 온도는 대기압에 있어서의 화물온도로 하고 정상상태의 화물탱크는 그 설계온도로 가정한다. 또한, 화물탱크 손상상태에 있어서도 선체는 정립 상태를 유지하는 것으로 가정할 수 있다.
3. 2차 방벽은 30도 정적 횡경사에서도 기능적 요건을 충족시켜야 한다.

402. 가열장치

1. 재료의 온도가 표 2.16에 명시된 재료의 등급에 따라 허용최저온도 이하로 떨어지지 않도록 하기 위하여 구조재료에 가열장치가 사용될 수 있다. 401.의 1항 계산에서 이러한 가열설비를 다음의 위치에 고려할 수 있다.
 - (1) 임의의 횡방향 선체구조
 - (2) 가열에 대한 계산을 고려하지 않으며, 재료가 대기 중 5°C 및 해수 0°C의 주위온도조건에 적합한 경우, 보다 낮은 주위온도가 요구될 경우, 401.의 2항에 규정하는 종방향 선체구조
 - (3) 상기 (2)를 대신하여, 화물탱크 혹은 액화가스연료 탱크 사이의 종격벽에 대해, 만약 재료가 -30°C의 최저설계온도 또는 가열을 고려하고 401.의 1항에 따라 결정된 온도보다 30°C 더 낮은 온도, 둘 중 더 낮은 온도에서 적절하게 유지된다면, 가열에 대해 고려할 수 있다.
2. 1항에 따른 가열수단은 다음 요건을 만족하여야 한다.
 - (1) 가열설비는 이 장치의 어떠한 부분이 고장난 상태에서도 예비의 가열장치에 의하여 이론적으로 필요한 열량을 100% 이상 공급할 수 있는 것이어야 한다.
 - (2) 가열장치는 중요 보기로서 고려하여야 한다. 1항 (1)호에 따라 제공되는 최소 하나 이상 시스템의 모든 전기 부품들에 비상전원이 공급되어야 한다.
 - (3) 가열장치의 설계 및 제작시 격납설비를 포함하여 우리 선급에 승인받아야 한다.

제 5 절 결과 도출

501. 일반

1. 내부선체와 외부선체를 연결하는 구조부재의 강재등급은 그 평균온도를 사용하여 결정한다.
2. 각 판재 온도는 판 두께 중앙의 온도로서 표시하고 각각의 부재에 대해서는 다음에 따른다.
 - (1) 판에 부착된 2차 휨보강재의 온도는 판의 온도와 같지만 2차 휨보강재의 깊이방향의 온도분포가 구분되어 있는 경우는 그 온도분포 면적 평균으로 한다.
 - (2) 판 또는 2차 휨보강재를 지지하는 1차 휨보강재의 온도는 웹에 대해서 깊이의 중앙에서의 온도로 하고 부재에 대해서는 면적의 온도로 한다.
 - (3) 내각과 외각을 접속하는 부재, 예를 들면 브래킷과 거더 등의 온도는 내각온도와 외각온도의 평균으로 한다.
 - (4) 브래킷에 대해서는 브래킷의 면적중심에 대한 온도로 한다.

502. 강재 선정

1. 화물 온도가 -10°C 미만인 경우, 선체구조에 사용되는 판 및 형강들의 재료 등급은 온도 계산 결과에 기초하여 선정되어야 한다.
2. 선박의 외판, 갑판 및 이들에 설치되는 모든 보강재는 3편의 관련 각 장의 규정에 적합하여야 한다. 다만, 저온화물의 영향에 따라 설계 상태에서 재료의 계산온도가 -5°C 미만으로 되는 경우, 표 2.16에 정하는 바에 따른다.
3. 화물온도의 영향으로 설계조건에서 계산된 온도가 0°C 보다 낮은 모든 기타 선체구조의 재료 및 2차 방벽을 구성하지 않는 재료는 표 2.16에 따른다. 이는 화물탱크를 지지하는 선체구조를 포함하며, 이중저 판, 종격벽판, 횡격벽판, 늑판, 웹, 스트링거 및 모든 부착된 보강재를 포함한다.

표 2.16 선체구조용 강재 적용

선체구조의 최저설계온도(°C)	강재 등급의 최대두께(mm)							
	A	B	D	E	AH	DH	EH	FH
0이상 ⁽¹⁾ -5이상 ⁽²⁾	우리 선급이 인정하는 기준에 따른다.							
0미만 -5까지	15	25	30	50	25	45	50	50
-5미만 -10까지	×	20	25	50	20	40	50	50
-10미만 -20까지	×	×	20	50	×	30	50	50
-20미만 -30까지	×	×	×	50	×	20	40	50
-30미만	선급 및 강선규칙 7편 5장 표 7.5.5의 두께제한과 동표 비교(2)의 제한을 적용하지 않을 경우를 제외하고 선급 및 강선규칙 7편 5장 표 7.5.5에 적합할 것							
(비고) “×”는 사용하지 않는 강재의 등급을 표시 (1) 502. 3항의 적용상 (2) 502. 2항의 적용상								

4. USCG Code에 따라, 갑판 스트링거 및 현측 후판은 최소 E 등급이어야 한다. 필지 만곡부는 D 등급 또는 E급 이어야 한다. 적용 범위는 표 2.17에 따른다.

표 2.17 부재에 대한 강재 적용 범위

부재 구분	적용 범위
갑판 스트링거	중양부 0.4L이내
현측 후판	중양부 0.4L이내
필지만곡부	중양부 0.4L이내

503. 용접봉 선정

1. 각종 강재의 용접이음에 대한 용접용 재료의 사용구분은 표 2.18에 따른다.
2. 동일강도로써 인성이 다른 강재 상호간의 이음에 사용하는 용접용 재료는 인성이 낮은 강재에 대한 것을 사용할 수 있다.
3. 강도가 다른 강재 상호간의 이음에 대한 용접용 재료에는 균열의 발생을 방지하는 대책을 고려할 것을 조건으로 하여 강도가 낮은 강재에 대한 것을 사용할 수 있다.
4. 고장력강재 상호간의 용접 또는 고장력강과 연강재의 피복아크 용접에는 저수소계 용접봉재료를 사용하여야 한다. 다만, 우리 선급이 인정하고 또한 강의 탄소당량이 0.41%이하일 때에는 보통의 용접봉을 사용할 수 있으며, 이 경우 우리 선급은 수소균열에 대한 시험을 요구할 수 있다. ↓

표 2.18 용접봉 선정

강재의 종류 및 재료 기호			용접용 재료의 기호 ⁽¹⁾
선체용 압연강재	연강	A	1, 2, 3, 1Y, 2Y, 3Y, 4Y, 5Y, 2Y40, 3Y40, 4Y40, 5Y40, L1, L2, L3
		B, D	2, 3, 1Y, 2Y, 3Y, 4Y, 5Y, 2Y40, 3Y40, 4Y40, 5Y40, L1, L2, L3
		E	3, 3Y, 4Y, 5Y, 3Y40, 4Y40, 5Y40, L1, L2, L3
	고장 력강	AH32, AH36	1Y ⁽²⁾ , 2Y, 3Y, 4Y, 5Y, 2Y40, 3Y40, 4Y40, 5Y40, L2 ⁽³⁾ , L3, 2Y42, 3Y42, 4Y42, 5Y42
		DH32, DH36	2Y, 3Y, 4Y, 5Y, 2Y40, 3Y40, 4Y40, 5Y40, L2 ⁽³⁾ , L3, 3Y42, 4Y42, 5Y42
		EH32, EH36	3Y, 4Y, 5Y, 3Y40, 4Y40, 5Y40, L2 ⁽³⁾ , L3, 4Y42, 5Y42
		FH32, FH36	4Y, 5Y, 4Y40, 5Y40, L2 ⁽³⁾ , L3, 4Y42, 5Y42
		AH40, DH40	2Y40, 3Y40, 4Y40, 5Y40, 3Y42, 4Y42, 5Y42, 2Y46, 3Y46, 4Y46, 5Y46
		EH40	3Y40, 4Y40, 5Y40, 3Y42, 4Y42, 5Y42, 3Y46, 4Y46, 5Y46
FH40	4Y40, 5Y40, 4Y42, 5Y42, 4Y46, 5Y46		
(비고)			
(1) 용접용 재료의 기호에 대하여는 선급 및 강선규칙 2편 표 2.2.16, 표 2.2.26, 표 2.2.34, 표 2.2.40 및 표 2.2.68에 따른다.			
(2) 1Y 용접용 재료로 고장력강을 용접하는 경우, 강재의 두께는 25 mm를 넘어서는 안 된다.			
(3) “L 2” 용접용 재료는 AH 32, DH 32, EH 32 또는 FH 32에만 적용한다.			

제 3 장 유한요소 열전달 해석법

제 1 절 모델링

101. 2차원 열전달

1. 2차원 열전달 해석 모델은 고체 요소(solid element) 혹은 셸요소(shell element)를 사용하여 진행한다. 두께 방향의 온도 분포를 고려해야 할 경우에는 고체 요소를 사용하여 진행하여야 한다.
2. 고체 요소를 사용할 경우, 격자 크기는 200mm*200mm 이하 및 두께 방향으로 2개 이상의 요소로 분할하여야 한다. 2차원 열전달 모델의 예제를 그림 3.1에 표시하였다.
3. 셸 요소를 사용할 경우, 격자 크기는 200mm*200mm 이하이어야 한다.

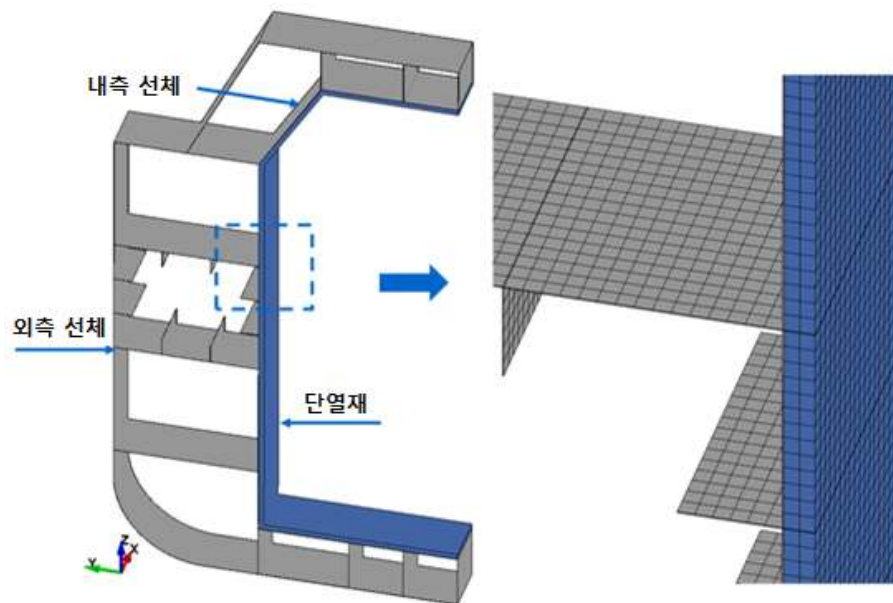


그림 3.1 2차원 열전달 해석 모델

102. 3차원 열전달

1. 코퍼댐을 고려한 해석이 필요한 경우, 열전달 해석 모델은 코퍼댐의 격벽 양쪽으로 확장하여, 선체 길이 방향을 고려한 3차원 열전달 해석을 수행하여야 한다.
2. 단열재 및 방벽은 내부 선체의 LNG 쪽에 모델링 한다.
3. 횡격벽은 유한요소 열전달 해석 모델에서 고려하여야 한다. 격벽은 LNG 접촉면에서만 단열되고 다른쪽은 보강재를 가지고 있어야 한다.
4. 3차원 열전달 해석 모델은 고체 요소(solid element) 혹은 셸요소(shell element)를 사용한다. 두께 방향의 온도 분포를 고려해야 할 경우에는 고체 요소를 사용한다.
5. 고체 요소를 사용할 경우, 격자 크기는 200mm*200mm 이하 및 두께 방향으로 2개 이상의 요소로 분할하여야 한다. 3차원 열전달 모델의 예제를 그림 3.2에 표시하였다.
6. 셸 요소를 사용할 경우, 격자 크기는 200mm*200mm 이하이어야 한다.

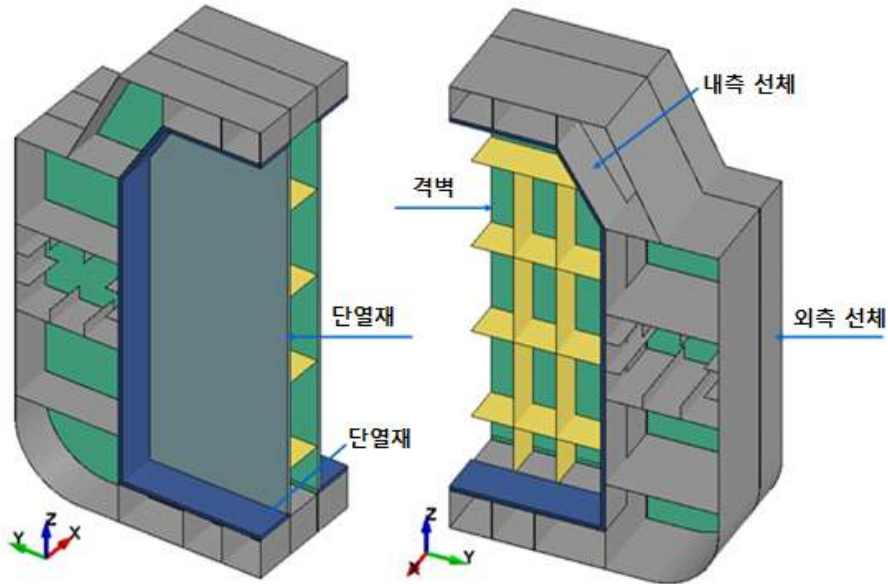


그림 3.2 3차원 열전달 해석 모델

제 2 절 재료 물성치

201. 일반사항

1. 2장 3절을 준용한다.

제 3 절 계산 조건

301. 일반사항

1. 2장 4절을 준용한다.
2. 각 부재의 환경에 따른 대류, 복사, 전도를 그림 3.3 및 표 3.1와 같이 고려하여야 한다.
3. 표 3.1의 온도 및 열전달 계수는 3장 결과를 기반으로 입력하여야 한다.

제 4 절 결과 도출

401. 일반사항

1. 2장 5절 501.을 준용한다.

402. 강재 선정

1. 2장 5절 502.을 준용한다.

403. 용접봉 선정

1. 2장 5절 503.을 준용한다.
2. 용접봉은 부재의 평균 온도를 사용하여 결정된 강재 등급에 기반하여 선정한다.

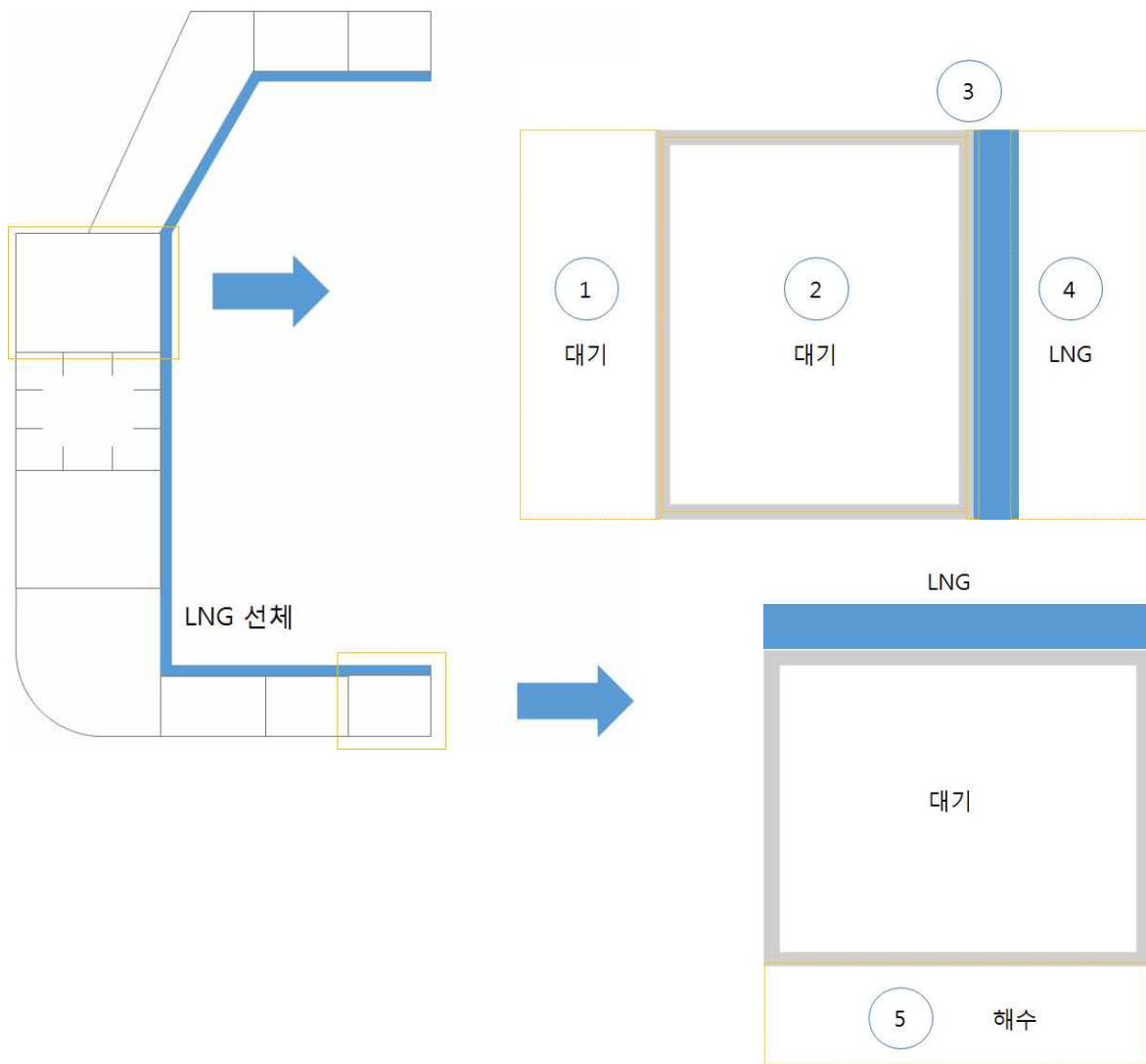
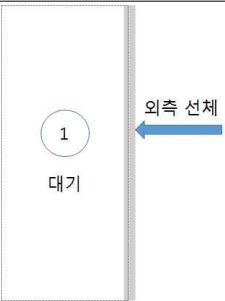
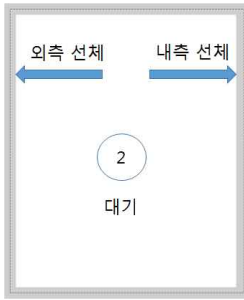
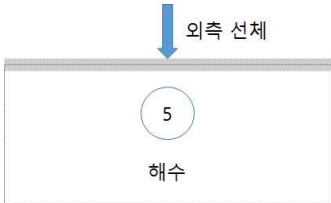


그림 3.3 액화가스 산적운반선 선체의 열전달 해석 시 유한요소모델링

표 3.1 열전달 해석 시 열전달 과정 반영

구조 부분	열전달 과정	유한요소 해석 입력
 1 대기	복사	대기 온도 외부 선체 표면 방사율
	대류	대기 온도 대류 열전달 계수
	전도	고려하지 않음
 2 대기	복사	구획 대기 온도 구획 표면의 view factor 구획 표면의 방사율
	대류	구획 대기 온도 대류 열전달 계수
	전도	강제 전도도 및 비열
 3	복사	고려하지 않음
	대류	고려하지 않음
	전도	강제 및 단열재의 전도도 및 비열
 4 LNG	복사	고려하지 않음 액화가스 온도를 2차 방벽에 추가함
	대류	고려하지 않음 액화가스 온도를 2차 방벽에 추가함
	전도	고려하지 않음 액화가스 온도를 2차 방벽에 추가함
 5 해수	복사	고려하지 않음
	대류	해수 온도 대류 열전달 계수
	전도	고려하지 않음



인 쇄 2020년 4월 6일

발 행 2020년 4월 17일

액화가스 산적운반선/연료추진선 열전달 해석 지침

발행인 이 형 철

발행처 한 국 선 급

부산광역시 강서구 명지오션시티 9로 36

전 화 : 070-8799-7114

FAX : 070-8799-8999

Website : <http://www.krs.co.kr>

신고번호 : 제 2014-000001호 (93. 12. 01)

Copyright© 2020, KR

이 지침의 일부 또는 전부를 무단전재 및 재배포시 법적제재를
받을 수 있습니다.